

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
ANÁLISIS ARMÓNICO EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA PARA
DETERMINAR LOS EFECTOS CAUSADOS POR LÁMPARAS HID USANDO
TRANSFORMADA DE WAVELET Y HILBERT HUANG.**

**AUTOR:
GLADYS GRACIELA TUPIZA PINARGOTE**

**TUTOR:
SILVANA FABIOLA VARELA CHAMORRO**

Quito, febrero 2020

Gladys Graciela Tupiza Pinargote

ANÁLISIS ARMÓNICO EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA PARA DETERMINAR LOS EFECTOS CAUSADOS POR LÁMPARAS HID USANDO TRANSFORMADA DE WAVELET Y HILBERT HUANG.

Universidad Politécnica Salesiana, Quito-Ecuador 2020
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña historia e información de contacto:



Gladys Graciela Tupiza Pinargote (Y'1989-M'06). Realizó sus estudios secundarios en “Colegio Fiscomisional Técnico Agropecuario Padre Miguel Gamboa”, se graduó en Físico Matemático. Egresada de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana – Quito Ecuador. Su trabajo se basa en Análisis de Armónico en Redes de Distribución.
gtupiza@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Silvana Fabiola Varela Chamorro (Y'1975). Se graduó en Ingeniería Eléctrica en la Escuela Politécnica Nacional en el año 2001 y de Máster en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en el Instituto Tecnológico de Morelia. Actualmente se encuentra trabajando como docente en la Universidad Politécnica Salesiana. Áreas de interés: Transitorios Eléctricos, Sistemas de Distribución.
svarela@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

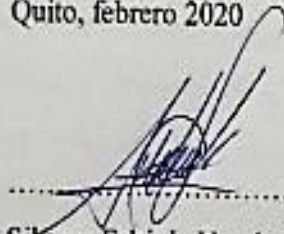
Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS
©2020 Universidad Politécnica Salesiana
QUITO-ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo Silvana Fabiola Varela Chamorro declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación *Análisis armónico en la red de distribución eléctrica para determinar los efectos causados por lámparas HID usando transformada de Wavelet y Hilbert Huang* realizado por Gladys Graciela Tupiza Pinargote obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, febrero 2020



Silvana Fabiola Varela Chamorro

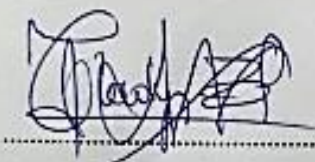
Cédula de identidad: 1713565818

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Gladys Graciela Tupiza Pinargote, con documento de identificación N° 2100433040, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación intitulado: "ANÁLISIS ARMÓNICO EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA PARA DETERMINAR LOS EFECTOS CAUSADOS POR LÁMPARAS HID USANDO TRANSFORMADA DE WAVELET Y HILBERT HUANG", mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Firma



Nombre: Gladys Graciela Tupiza Pinargote

Cédula: 2100433040

Fecha: Quito, febrero 2020

INDICE GENERAL

1. Introducción	10
2. Calidad de energía en los sistemas de distribución.....	12
2.1. Técnica matemática de Wavelet.....	13
2.2. Interpretación de señales	13
2.3. Técnica matemática de Hilbert Huang HHT.....	14
3. Formulación del problema	15
4. Análisis de resultados.....	19
4.1. Análisis de espectro wavelet fase-1.	19
4.2. Análisis de espectro wavelet fase-2.	20
4.3. Análisis HHT fase-1.....	20
4.4. Análisis HHT fase-2.....	21
4.5. Análisis de armónicos	21
4.6. Discusión de resultados.....	22
5. Conclusiones	22
6. Trabajos futuros.	23
7. Referencias.....	24
8. Matriz de estado del arte	28
8.1. Resumen e Indicadores del estado del arte	31

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estudio de armónicos de LHID.	11
Figura 2. Señal reconstruida.....	15
Figura 3. Árbol de descomposición.	16
Figura 4. Nodo 63 del árbol de coeficientes.	17
Figura 5. Nodo 126 del árbol de coeficientes.	17
Figura 6 Proceso de HHT.....	18
Figura 7 Espectro corriente RMS Fase 1 Wavelet.	19
Figura 8 Espectro corriente (%) Fase 1 Wavelet.	19
Figura 9 Espectro corriente RMS Fase 2 Wavelet.	20
Figura 10 Espectro corriente (%) Fase 2 Wavelet.	20
Figura 11 Funciones de modo intrínseco Fase 1 Hilbert Huang.....	20
Figura 12 Señal tiempo-frecuencia Fase 1. Hilbert Huang.	21
Figura 13 Funciones de modo intrínseco Fase 2 Hilbert Huang.....	21
Figura 14 Señal tiempo-frecuencia Fase 2. Hilbert Huang.	21
Figura 15 Temática de estado de arte.....	31
Figura 16 Formulación del problema del estado de arte.	31
Figura 17 Solución propuesta del estado de arte.....	32

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 : Características de diversas lámparas [8].	10
Tabla 2 : Cuadro descriptivo de escalas de Wavelet.	13
Tabla 3 : Parámetros técnicos del transformador a medir.	15
Tabla 4 : Parámetros técnicos de luminaria tipo HID.	15
Tabla 5 : Parámetros para la creación del árbol de descomposición.	16
Tabla 6 : Bandas de descomposición.	16
Tabla 7 : Comparación de resultados wavelet y norma IEEE-529.	22
Tabla 8 : Matriz de estado del arte	28

ANÁLISIS ARMÓNICO EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN PARA DETERMINAR LOS EFECTOS CAUSADOS POR LÁMPARAS HID USANDO TRANSFORMADA DE WAVELET Y HILBERT HUANG

Resumen

En la presente investigación se describe el estudio armónico, de un circuito de luminarias de alta intensidad de descarga (HID) mediante el cálculo de la Transformada de Wavelet y la Transformada de Hilbert Huang para determinar su incidencia sobre los armónicos de la red. Se considera que tradicionalmente las luminarias tipo HID suelen estudiarse como cargas resistivas sin embargo son de naturaleza no lineal. El análisis de wavelet se basa en la descomposición de la onda de corriente en coeficientes de detalle y aproximación con el fin de obtener un espectro de 32 armónicos. En el análisis de Hilbert Huang se descompone a la señal original de la red en funciones de descomposición en modo intrínseco con su respectiva frecuencia instantánea y el momento de variación de cada armónica. El estudio se aplica a los datos obtenidos de un analizador de red instalado en un tramo de iluminación de la ruta viva de la ciudad de Quito.

Los armónicos obtenidos a partir de la aplicación de las transformadas se comparan con los valores establecidos el estándar IEEE 519, para determinar si los armónicos presentes están dentro de los límites aceptables para cumplir con los requerimientos de calidad de la energía.

Palabras Clave: Análisis armónico, coeficientes de aproximación, coeficientes de detalle, armónicos, distorsión armónica, lámparas HID, Wavelet, Hilbert Huang.

Abstract

In the present investigation, the harmonic study of a high intensity discharge (HID) luminaire circuit is described by calculating the Wavelet Transform and the Hilbert Huang Transform to determine its incidence on the harmonics of the network. It is considered that traditionally HID type luminaires are usually studied as resistive loads however they are non-linear in nature. Wavelet analysis is based on the decomposition of the current wave into detail and approximation coefficients in order to obtain a spectrum of 32 harmonics. In the analysis of Hilbert Huang, the original signal of the network is decomposed into decomposition functions in intrinsic mode with its respective instantaneous frequency and the moment of variation of each harmonic. The study is applied to the data obtained from a network analyzer installed in a lighting section of the living route of the city of Quito.

The harmonics obtained from the application of the transformed ones are compared with the values established in the IEEE 519 standard, to determine if the harmonics present are within the acceptable limits to meet the energy quality requirements.

Keywords: Harmonic analysis, approximation coefficients, detail coefficients, harmonics, harmonic distortion, HID lamps, Wavelet, Hilbert Huang.

1. Introducción

A lo largo de los años las técnicas de iluminación han evolucionado de forma significativa, al igual que las necesidades de la demanda, surgiendo diversos tipos de luminarias[1]. En los sistemas de iluminación pública modernos se suelen instalar bombillos tipo HID, debido a su gran rendimiento lumínico, aunque su reproducción cromática no es elevada, es decir que los colores no se distinguen muy bien. Es por lo que las luminarias HID son empleadas en lugares donde no es necesario una importante calidad de luz, pero si una cantidad suficiente de la misma, un caso de ello se refiere a las vías públicas. [2]

El uso de lámparas de mercurio se está reduciendo cada vez más, debido a que la eficiencia que posee este tipo de lámpara es inferior a la de sodio. Pero este tipo de luminaria no requiere de un cebador o igmitor, lo que implica que son más económicas, además de poseer una vida útil muy larga. Estos aspectos son los más relevantes que no permiten que se dejen de usar las lámparas de mercurio por completo, a pesar de su bajo rendimiento. [3] [4]

Existe otro tipo de lámpara denominada MH (Metal Halide), la cual posee una gran capacidad de reproducción cromática, lo que las hace muy populares en la iluminación de locales comerciales, formado parte del denominado alumbrado decorativo. Debido a su alto rendimiento y su capacidad cromática este tipo de luminaria sustituye el uso de lámparas incandescentes de vapor halógeno, es decir a los bombillos dicróicos [5]. Un uso muy común de las luminarias MH es en el alumbrado deportivo, debido a que se requiere una calidad lumínica relativamente alta, pero la utilidad de estas se extiende hasta los hogares, dentro de estos se emplean lámparas MH de baja potencia (70-150W). Esto es posible debido a la mejora de la tecnología, que las hace cada vez más eficientes y económicas

[6]. Otro uso en la actualidad de las luminarias MH es en los faros delanteros de los automóviles, por su gran rendimiento y el desarrollo de circuitos electrónicos capaces de hacerlas encender inmediatamente, hace que sean luminarias estándar dentro de algunos modelos lujosos. [7]

En la tabla 1 se presenta un cuadro con las diversas características de los distintos tipos de luminarias.

Tabla 1 : Características de diversas lámparas [8].

Tipo de Lámpara	Potencia nominal (W)	Rendimiento Lumínico (Lm/W)
Incandescente standard	40	11
Fluorescente	40	80
Mercurio	400	58
Metal Halide	400	78
Sodio a alta presión	400	120

Pero el empleo de los distintos tipos de luminarias para el alumbrado público y dentro del hogar pueden ocasionar un cambio en la naturaleza de la carga al sistema eléctrico, transformándola en carga no lineal [9]. Esto es un gran problema porque se pueden generar armónicos en la red de distribución, provocando pérdidas en varios sentidos [10]. Es por lo que el análisis de los armónicos que producen este tipo de luminarias es un tema atractivo y debe ser abordado para identificar medidas correctivas, prevenir daños en la red y garantizar la calidad de la energía. [11] [12]

El estudio de armónicos es un tema extenso por lo que es necesario conocer los distintos métodos que se pueden emplear para dicho análisis.

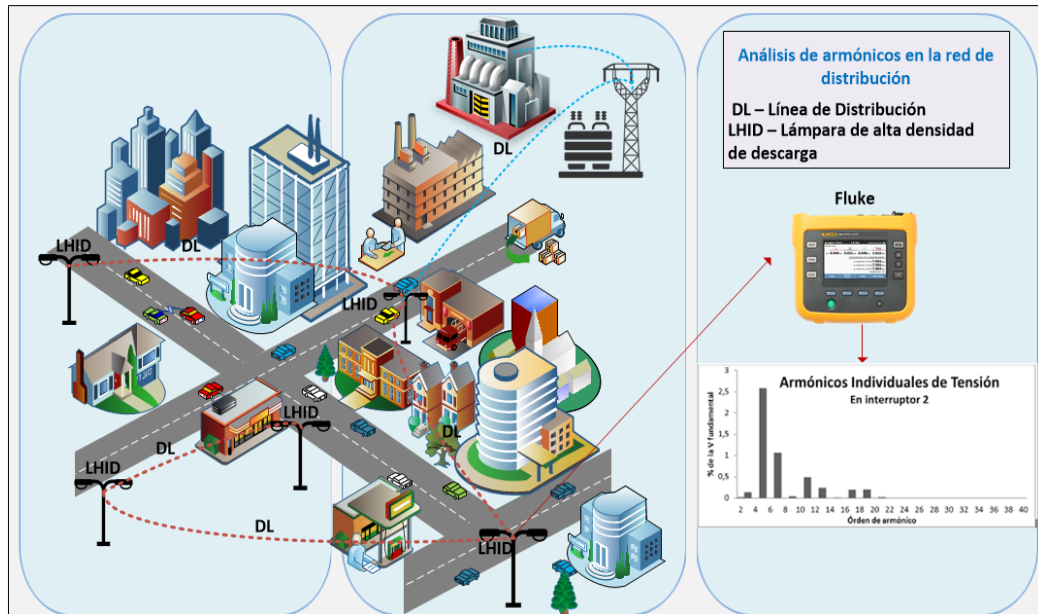


Figura 1. Estudio de armónicos de LHID.

En [13] realiza un estudio del impacto que producen las HPS (lámparas de sodio de alta presión), enfocándose en la calidad de la energía. Para ello el autor propone la modelación de un prototipo de lámpara HID para medir el factor de potencia y las perturbaciones armónicas que generan las luminarias modeladas en el sistema de distribución. Posterior a la simulación que realiza en Matlab-Simulink compara luminarias fluorescentes compactas.

Determina que el uso masivo de luminarias HID genera distorsión armónica adicional en el voltaje de la línea, sin embargo, se encuentra en los límites permitidos por la norma.

En [14] propone una nueva topología para las lámparas HID, esta consiste en usar una onda sinusoidal con un tercer armónico superpuesto. Esto permite que la luminaria use una forma de onda cuadrada, lo que contribuye a reducir el contenido de armónicos. Para comprobar la metodología que propone realiza una implementación de la luminaria propuesta. Determina que la modificación de la forma de onda con la que trabaja la luminaria es viable para un funcionamiento estable de las lámparas HID, además la tercera armónica super

puesta en la topología contribuye de forma directa a reducir los armónicos, además es posible expandir el contenido armónico superpuesto desde el quinta en adelante.

En [15] analiza el fenómeno de la resonancia acústica en lámparas HID, identificando que dicho factor es el mayor inconveniente que poseen este tipo de luminarias. Además, propone dos tipos de inversores no resonantes de alta frecuencia, eliminando el problema de resonancia. Para ello lo hace mediante una conversión de corriente continua a corriente alterna, es decir la red alimenta un convertidor, este a su vez proporciona a través de un inversor voltaje AC a la luminaria. Al finalizar el trabajo comprueba que los dos modelos propuestos por el autor son eficientes, pero existe un inconveniente con el transistor, puesto que es fuertemente conmutado, esto implica problemas de interferencia electro magnética.

En [8] hace una estudio para cuantificar la cantidad de armónicos presentes en la red de distribución, lo realiza mediante pruebas de laboratorio con luminarias existentes en el mercado y que son utilizadas para la iluminación en hogares como en la vía pública, una vez

cuantificado el nivel de armónicos comprueba que el nivel de armónicos en algunos casos sobrepasa el límite permitido, además afirma que el tercer y quinto armónico son los más significativos. Finalmente desarrolla una guía para mitigar la generación de armónicos, proponiendo el reemplazo de luminarias convencionales por iluminación CFL, led entre otras.

En [16] emplea la transformada discreta de Fourier para cuantificar los armónicos de la red, además propone una mejora en la filtración espectral de la DFT, con el fin de obtener mejor precisión en los resultados. Comprueba que el estudio armónico aplicando el método de Fourier con parámetros modificados es muy efectivo, además menciona que el uso de la ventana de Blackman durante el análisis aumenta mucho la eficiencia.

En [17] realiza un análisis de armónicos de la carga de un auto eléctrico de la UPS, para ello emplea el método de Hilbert Huang. Para validar el método propuesto lo compara con el análisis de armónicos usando la transformada de Fourier. Comprueba que el método de Hilbert Huang es óptimo para el análisis de armónicos debido a que este hace un análisis espectral y descompone la onda en varios IMF, tomando en cuenta la variación estacional de los registros excluidos por otros procedimientos. Además, afirma que el método de Hilbert Huang es el mejor para el estudio armónico, debido a que proporciona un detalle de mayor calidad en términos de espectros armónicos[10].

En [18] propone al análisis del contenido espectral de una señal mediante la transformada de wavelet, para ello emplea instrumentos de medida(Fluke), con el fin de comprobar los diferentes tipos de perturbaciones y posterior a ello compararlos con las normas IEEE para armónicos. Una vez obtenida la señal, emplea la herramienta Wavelet Packet con el fin de estudiar la onda de sinusoidal y obtener parámetros de

detalle y aproximación, los cuales se emplea para calcular los valores rms de la fundamental y de las demás armónicas. Los resultados obtenidos los comprueba con las normas IEEE para armónicos. Además, menciona que la mejor familia para realizar el análisis de armónicos es la Daubechies. [18]

2. Calidad de energía en los sistemas de distribución.

La red de distribución de energía eléctrica es el encargado de proveer potencia eléctrica a los usuarios finales, como los usuarios residenciales, usuarios industriales, pero también al alumbrado público. Este tipo de usuarios poseen muchos dispositivos electrónicos que conectan a la red por ejemplo luminarias de diferentes tipos, cargadores, hornos etc. Los diferentes tipos de dispositivos contribuyen con una carga específica a la red, esta carga puede ser de tipo lineal o no línea. Las cargas lineales no representan un inconveniente mayor debido a que en su mayor parte son de naturaleza resistiva, es decir no afectan a la forma de onda de la red ni a la generación de armónicos. La naturaleza de las cargas no lineales afecta a la red puesto que son aquellas contienen capacitores, inductores, como el caso de los balastos para encender luminarias de alta densidad. Este tipo de cargas afecta a la forma de onda de la red, así como a la generación de armónicos que pueden ocasionar pérdidas, disminuir la calidad de energía, calentar transformadores, etc. [19][20]

Las cargas no lineales están presentes en la iluminación pública, en específico en las lámparas HID, este tipo de lámparas usan un balastro de alta frecuencia que produce una cantidad de armónicos considerables y afecta a la red [21]. Este tipo de lámparas no están en funcionamiento durante todo el día, solo entran en funcionamiento desde una hora determinada de la tarde-noche. Pero en el lapso mencionado la demanda en general

aumenta mucho, es decir los hogares tienen mucha más actividad, lo que implica que los dispositivos electrónicos de carga no lineal entran en funcionamiento de manera simultánea y coincidente en muchos casos. Por ello es necesario cuantificar el nivel de armónicos que produce las lámparas HID, la técnica de Wavelet y Hilbert Huang son esenciales para corroborar el nivel armónico permitido, en contraste con la normativa IEEE 519-1992. [22] [23]

2.1. Técnica matemática de Wavelet

Es un método muy útil para analizar grandes cantidades de señales, por ejemplo, señales no estacionarias, ondas transitorias, entre otras [24]. Este método proporciona una representación de la señal en tiempo y frecuencia. El método consiste en el uso de diferentes ventanas de tiempo con tamaños variables. Cada ventana es usada para un fin específico, es decir las ventanas estrechas se corresponden a grandes frecuencias, mientras que las ventanas largas se emplean en el análisis de tiempo de bajas frecuencias, garantizando un detalle de la onda significativo. [25]

A partir de la señal fundamental es posible obtener bloques que contienen información de tiempo y escala. Estos bloques se pueden generar a partir de la wavelet madre, en la cual relaciona variables de traslación y escala. [26]

$$\Psi_{\tau,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{|S|}} \Psi\left(\frac{t-\tau}{S}\right) \quad (1)$$

$\tau, S \in R, S \neq 0$

Donde:

$\Psi(t)$ wavelet madre.

τ parámetros de traslación.

S parámetros de escala.

2.1.1 Traslación

La traslación corresponde al patrón que dispondrá la ventana de análisis, debido

a que la onda fundamental se desplaza en el tiempo. [27]

2.1.2 Escala

La escala es de utilidad para obtener varias visiones de la señal. La escala de menor magnitud corresponde a una calidad de análisis más fino, por el contrario una magnitud mayor implica un análisis global [18]. En la tabla 2 se presenta un cuadro descriptivo de escalas Wavelet.

Tabla 2 : Cuadro descriptivo de escalas de Wavelet.

Escala	Descripción
Reducida	Es de utilidad para el registro de detalles transitorios, correspondientes a grandes frecuencias
Extensa	Empleado para el registro de detalles que varían muy lento, correspondiente a frecuencias pequeñas.

Cuando se habla del término análisis, se interpreta como el procesamiento de la onda. Por lo contrario el resumen se refiere al cálculo de la técnica matemática Wavelet para obtener la reconstrucción completa de la onda [16]. La técnica matemática corta señales en varios segmentos, para detectar pequeñas escalaciones y desplazamientos de la onda fundamental. [27]

2.2. Interpretación de señales

Es posible interpretar señales empleando la herramienta computacional MATLAB 2019b mediante la herramienta Wavelet Packet, la cual es de utilidad para el análisis multi resolución. La descomposición consiste en el cálculo de los parámetros de detalle mas no los de aproximación. Esto implica un pequeño problema puesto que se puede perder parte de la información de la onda en

análisis [28]. Existe una herramienta propia de Matlab que proporciona el análisis multi resolución haciendo uso de Wavelet Packet mediante código lineal para generar el árbol de descomposición. A continuación, se muestra el código que se emplea para generar el árbol.

$$T = \text{wpdec}(\text{datos}, \text{nivel}, \text{familia}, \text{entropia}) \quad (2)$$

Donde:

T es el nombre del árbol.

wpdec es el comando propio de Matlab para crea un árbol multi resolución.

datos es la señal de entrada.

nivel es el nivel de descomposición deseado.

familia es la familia wavelet a usar.

entropia es el tipo de entropía que se usa para el cálculo.

Con los coeficientes de aproximación y detalle es posible emplear varias expresiones para calcular los valores rms de toda la onda y de cada armónica. [29] [30]

A continuación, se presenta las expresiones para la obtención de la magnitud rms de la onda de tensión y corriente.

$$v = \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{i=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} [c_j^i(k)]^2} \quad (3)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{i=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} [c_j^{*i}(k)]^2} \quad (4)$$

Donde:

v es la tensión rms

I es la corriente rms

2^N es la cantidad de mediciones de la señal

c_j^i y c_j^{*i} son los parámetros resultantes de árbol de descomposición.

i es el elemento i del árbol n .

j es el elemento j del árbol n .

2.3. Técnica matemática de Hilbert Huang HHT

La transformada matemática HHT es definida en el dominio del tiempo, cuyo resultado es de una convolución entre $1/(\pi t)$ y la función $x(t)$ [31] [32].

$$H[x(t)] = \frac{1}{\pi} PV \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (7)$$

Donde:

PV es el valor principal de la integral singular.

La Transformada de Hilbert consiste en la convolución entre la función de estudio y el inverso del tiempo, como consecuencia enfatiza las propiedades de la función local. La transformada de HHT se usa para la reconstrucción analítica de señales como [33] [34] [35]:

$$\begin{aligned} z(t) &= x(t) + iy(t) \\ z(t) &= x(t) + iH[x(t)] \end{aligned} \quad (8)$$

La señal analítica es compleja, posee un espectro de frecuencias nulo cuando se trata de frecuencias negativas, por otro lado, la parte real es la señal original como se representa en la siguiente expresión [36] [37]:

$$z(t) = a(t)e^{-i\theta(t)} \quad (9)$$

Donde:

$$a(t) = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (10)$$

$$\theta(t) = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \quad (11)$$

La señal analítica permite separar las componentes de amplitud y fase instantáneas. La frecuencia instantánea es posible calcular con la siguiente expresión [38] [39].

$$IF(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \theta(t) \quad (12)$$

3. Formulación del problema

Para el estudio armónico se obtiene mediciones de un tramo del alumbrado público, correspondiente al caso de estudio para la presente investigación.

El tramo de luminarias en mención incluye luminarias HID.

Las mediciones fueron realizadas por la Empresa Eléctrica Quito mediante una petición.

Para las mediciones se empleó un analizador de calidad eléctrica (Fluke 1744), mismo que fue instalado en campo, específicamente en el lado de baja del transformador que alimenta a un tramo de luminarias de la ruta viva.

A continuación, se presentan los parámetros técnicos del transformador. En la tabla 3 se presenta los parámetros técnicos del transformador a medir.

Tabla 3 : Parámetros técnicos del transformador a medir.

Transformador	Parámetro
Marca	Inatra
Potencia	25 kVA
Voltaje del secundario	120V
Corriente del secundario	104,17A

Las mediciones se registraron en intervalos de 10 minutos durante 7 días continuos, pero para la reconstrucción de la onda sinusoidal se escogió una medición de 10 minutos de toda la muestra generada.

Los tipos de luminarias que fueron contemplados para la medición son lámparas tipo HID como anteriormente se mencionó.

A continuación, se presenta las características técnicas de la lámpara tipo HID. En la tabla 4 se describen los parámetros técnicos de la luminaria HID aplicada para el estudio en curso.

Tabla 4 : Parámetros técnicos de luminaria tipo HID.

Tipo de luminaria	Parámetro
HID	100 W
Potencia	10000 lumen
Temperatura	0-180°C
Arranque	2.5 kV

Los datos obtenidos como resultado de las mediciones son promediadas considerando un intervalo de tiempo, por lo que se analiza la muestra correspondiente a un día para obtener la sinusoidal completa. Para el proceso de reconstrucción de la señal se aplica la siguiente expresión: [40] [41]

$$\sum_{n_1}^n n * \sin(2 * \pi * f * t) \quad (13)$$

En donde:

f es la frecuencia.

t es el tiempo para un ciclo.

n son los armónicos desde n_1 hasta n .

A continuación, se presenta la señal reconstruida.

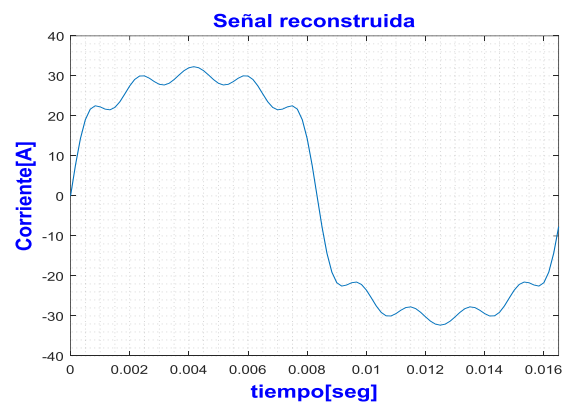


Figura 2. Señal reconstruida.

La Figura 2 presenta los resultados de la onda sinusoidal real, misma que será empleada para el análisis de armónicos. La técnica de wavelet se caracteriza por la descomposición multiresolución, mediante la construcción del árbol de descomposición. La creación del árbol en mención se lo hace mediante código de programación en Matlab.

En la tabla 5 se presentan los parámetros para la creación del árbol de descomposición.

Tabla 5 : Parámetros para la creación del árbol de descomposición.

Atributo	Descripción
Datos de entrada.	Obtenidos de la reconstrucción de los datos medidos
Nivel	6
Familia Wavelet	Db4
Entropía	Shannon

Se elige el nivel 6 y la familia Db4 debido a que en [18] comprueba que la familia DB4 es la más precisa para realizar análisis de armónicos, así como el nivel 6 y la entropía de Shannon pues posee mejor precisión en la descomposición de señales [32]. La construcción del árbol descompone la onda de entrada en diferentes bandas, existen 64 bandas con un rango de frecuencias determinado, distribuidas en 6 niveles. Se suman los nodos en pares, obteniendo 32 puntos que corresponde a los armónicos analizados. En la tabla 6 se presentan las bandas de descomposición y el árbol que se genera con los datos de la señal reconstruida.

Tabla 6 : Bandas de descomposición.

Banda	Frecuencia Hz
1	30-90
2	90-150
3	150-210
4	210-270
5	270-330
6	330-390
7	390-450
8	450-510
9	510-570
10	570-630
11	630-690
12	690-750
13	750-810
14	810-870
15	870-930
16	930-990
17	990-1050

Banda	Frecuencia Hz
18	1050-1110
19	1110-1170
20	1170-1230
21	1230-1290
22	1290-1350
23	1350-1410
24	1410-1470
25	1470-1530
26	1530-1590
27	1590-1650
28	1650-1710
29	1710-1770
30	1770-1830
31	1830-1890

En cada nivel del árbol de descomposición se encuentran los coeficientes de detalle y aproximación, mismos que se emplean para el cálculo de la magnitud RMS de la señal completa, así como para el cálculo de los valores RMS de las 32 armónicas.

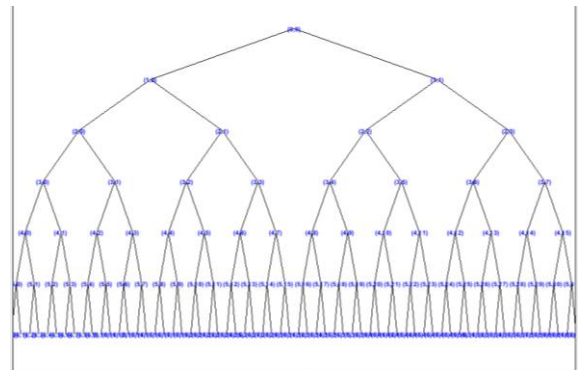


Figura 3. Árbol de descomposición.

El árbol de descomposición posee 6 niveles, mismos que contienen los parámetros de detalle y aproximación correspondiente al punto de división en cada nivel como se presentó en la Figura (3).

A continuación, se presenta el primer conjunto de datos del primer nodo correspondiente al sexto nivel.

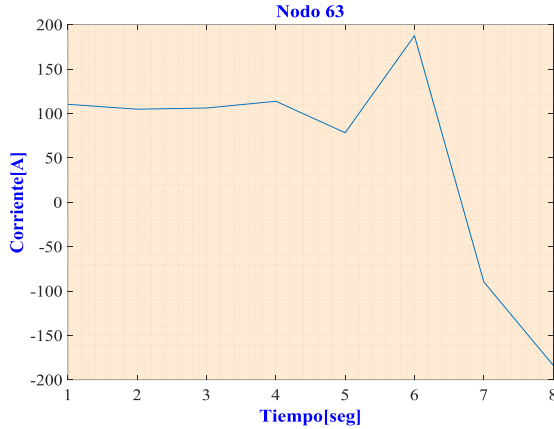


Figura 4. Nodo 63 del árbol de coeficientes.

El primer punto de nivel 6 corresponde al conjunto de datos del coeficiente de detalle cómo se observa en la Figura 4. En la Figura 5 se presenta el último conjunto de datos del nivel 6 que corresponde al último coeficiente de aproximación.

El cálculo del componente armónico se basa en el análisis de los conjuntos de datos resultantes del árbol de coeficientes.

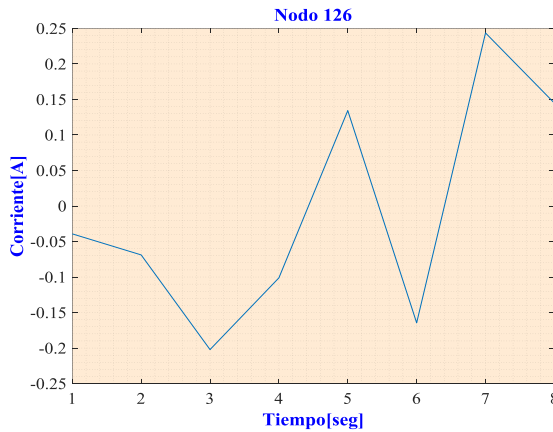


Figura 5. Nodo 126 del árbol de coeficientes.

El problema expresado es posible resolverlo con las ecuaciones (3), (4), (5) y (6), englobadas en el siguiente pseudocódigo.

Algoritmo para determinar el porcentaje armónico mediante la Transformada matemática de Wavelet.

Paso 1: Reconstrucción de la onda completa.

Paso 2: Parametrización de datos de entrada.

Paso 3: Calcular del árbol de coeficientes.

$$\text{árbol} = \text{wpdec}(\text{datos}, 6, \text{db4}, \text{shannon})$$

Paso 4: Hacer desde 63 hasta 126.

$$\text{wpc} = \text{wpccoef}(\text{arbol}, i)$$

Paso 5: Calcular valor rms de la señal completa

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{i=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} [c_j^i(k)]^2}$$

Paso 6: Calcular para 1 hasta 32

$$\sqrt{\frac{\sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} [c_j^{i_1}(k)]^2 + \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} [c_j^{i_2}(k)]^2}{2^N}}$$

Paso 7: Graficar armónicos

Terminar

Para implementar el algoritmo propuesto se empleará el software MATLAB 2019b.

La técnica HHT se basa en la descomposición de la onda original en señales de naturaleza oscilatoria, para el cómputo de la envolvente y la fase instantánea. El análisis hace uso de la descomposición empírica de modos (por sus siglas en inglés EMD), lo cual permite descomponer la señal unidimensional en una suma de señales denominadas IMF, estas señales poseen diferentes niveles de resolución, empezando por el detalle más fino. Las IMF poseen las siguientes características:

- Es de amplitud y frecuencia modulada.
- Es de banda limitada

- El número de cruces por cero debe ser igual al número de extremos.
- El promedio de las envolventes tanto superiores como inferiores debe ser 0.

Para el cálculo de las IMF se extrae las oscilaciones de frecuencia alta, mismas que están contenidas en otras oscilaciones de frecuencia menor.

Como se observa en la figura 6, el parámetro de entrada $x(t)$, sirve para el cálculo de la envolvente superior $E_{max}(t)$ y la envolvente inferior $E_{min}(t)$, para posterior sumar los resultados.

Como consecuencia de la suma se obtiene una media local que se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$d(t) = x(t) - m(t) \quad (13)$$

En donde:

$d(t)$ es el promedio de la envolvente superior e inferior

$x(t)$ es la señal de entrada

$m(t)$ es la media local

Posterior a ello se compara el detalle local con un umbral, este representa la posibilidad de descomponer nuevamente la señal.

Si la condición de umbral no cumple, la señal se vuelve a descomponer, creando un nuevo IMF, pero la señal de entrada para la descomposición es el promedio de la envolvente superior e inferior calculado con anterioridad.

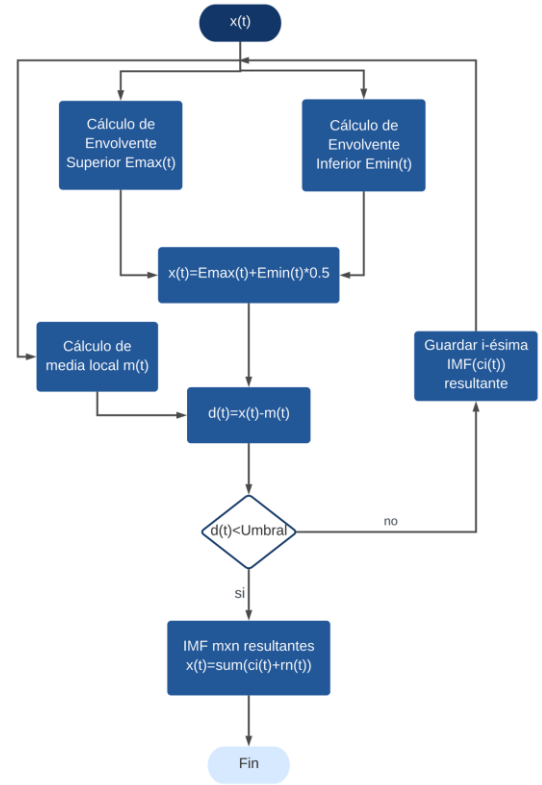


Figura 6 Proceso de HHT.

$$d_{1k} = d_{1(k-1)} - m_{1k} \quad (14)$$

En donde:

d_{1k} es el promedio de la envolvente superior e inferior de la iteración k.

$d_{1(k-1)}$ es el promedio de la envolvente superior e inferior de la iteración k-1.

m_{1k} es la media local k.

Este proceso de descomposición sigue hasta que la señal ya no puede ser descompuesta en otra. La cantidad de IMF resultante depende de las veces que se descompone la señal.

$$x(t) = \sum_{i=1}^N c_i(t) + r_N(t) \quad (15)$$

En donde:

$x(t)$ señal resultante final.

$c_i(t)$ es la IMF i.

$r_N(t)$ es el residuo de la señal resultante.

A continuación, se presenta el algoritmo para el estudio armónico aplicando la técnica HHT.

Algoritmo para el estudio armónico aplicando HHT.

- Paso 1:** Reconstrucción de la onda completa.
Paso 2: Ingresar señal reconstruida(datos)
Paso 3: Calcular de la envolventes superior e inferior.
Paso 4: Calculo de las IMF

$$d(t) = x(t) - m(t)$$

- Paso 5:**Comprobar el umbral, si el umbral no se cumple se calcula una nueva IMF. Caso contrario ir a paso 3.

$$d_{1k} = d_{1(k-1)} - m_{1k}$$

- Paso 6:** si se cumple el umbral, calcular la señal resultante final.

$$x(t) = \sum_{i=1}^N c_i(t) + r_N(t)$$

- Paso 7:** Graficar IMF

Terminar

El algoritmo propuesto se implementará en el software MATLAB 2019b.

4. Análisis de resultados

Para comprobar el procedimiento propuesto se presentan los armónicos del 1 al 32 producidos en un circuito de alumbrado público de la ruta viva. El circuito que alimenta al tramo de iluminación es bifásico, por lo que se aplicara el análisis a cada fase por el método de wavelet y Hilbert Huang.

4.1. Análisis de espectro wavelet fase-1.

A continuación, se presenta el espectro obtenido de la fase 1 por el método de Wavelet.

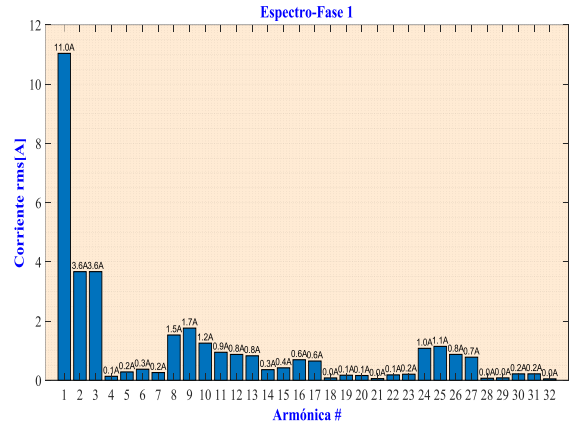


Figura 7 Espectro corriente RMS Fase 1 Wavelet.

En el espectro obtenido en la Figura 7 se observa que los armónicos con mayor amplitud son el tercer armónico con una magnitud de 3.669 A y el segundo armónico con una magnitud de 3.668 A, mientras que el quinto armónico tiene una magnitud de 0.2825 A, también existe gran presencia de los armónicos 8vo, 9no y 10mo con una magnitud de 1.52, 1.76 y 1.25 A respectivamente, mientras que el contenido armónico restante tiene una magnitud inferior a 1.25 A.

A continuación, se presenta el espectro wavelet obtenido en porcentaje.

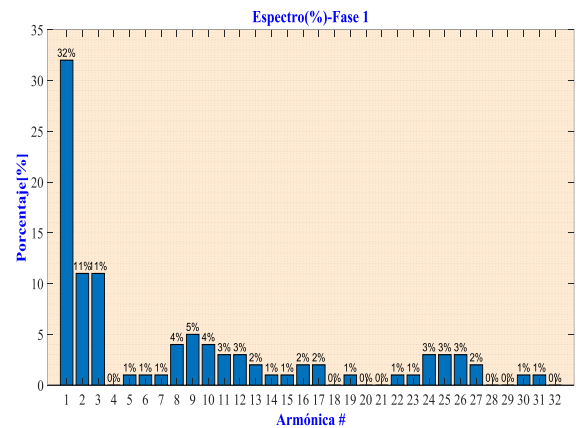


Figura 8 Espectro corriente (%) Fase 1 Wavelet.

En el espectro presentado en la Figura 8 se observa que los armónicos con mayor porcentaje son el segundo y el tercer armónico con un porcentaje del 11%, seguido del noveno armónico con un

porcentaje del 5%, mientras que el armónico octavo y décimo presentan un porcentaje del 4%. Los armónicos restantes presentan un porcentaje inferior al 4%.

4.2. Análisis de espectro wavelet fase-2.

El espectro obtenido de la fase 2 por el método de wavelet se presenta en la Figura 9.

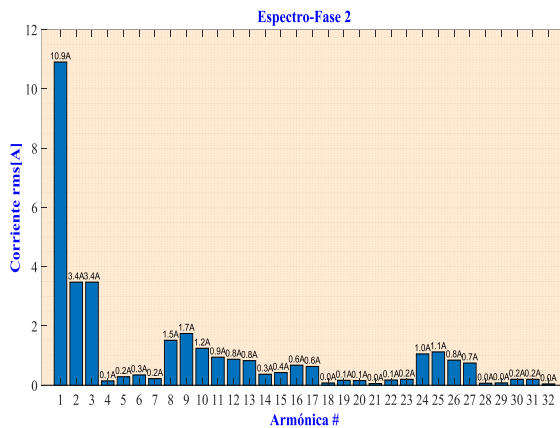


Figura 9 Espectro corriente RMS Fase 2 Wavelet.

En el espectro obtenido en la Figura 9 se observa que los armónicos con mayor amplitud son el tercer y segundo armónico con una magnitud de 3.4 A y, mientras que el quinto armónico tiene una magnitud de 0.2 A, también existe gran presencia de los armónicos 8vo, 9no y 10mo con una magnitud de 1.5, 1.7 y 1.2 A respectivamente, mientras que el contenido armónico restante tiene una magnitud inferior a 1.2 A. A continuación, se presenta el espectro wavelet obtenido en porcentaje.

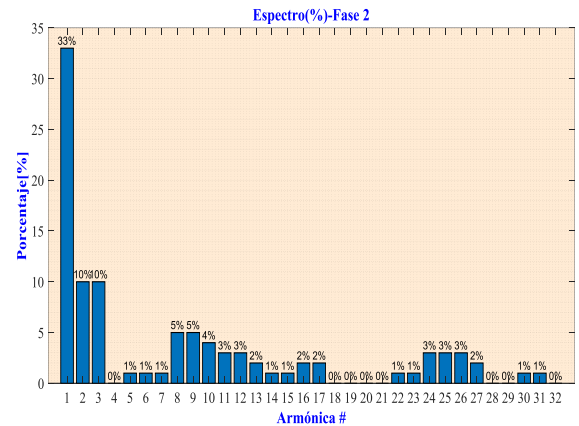


Figura 10 Espectro corriente (%) Fase 2 Wavelet.

En el espectro presentado en la Figura 10 se observa que los armónicos con mayor porcentaje son el segundo y el tercer armónico con un porcentaje del 10%, seguido del octavo y noveno armónico con un porcentaje del 5%, mientras que el décimo armónico presenta un porcentaje del 4%. Los armónicos restantes presentan un porcentaje inferior al 4%.

4.3. Análisis HHT fase-1.

A continuación, se presenta las funciones de modo intrínseco (IMF) obtenidos de la fase 1 por el método de Hilbert Huang.

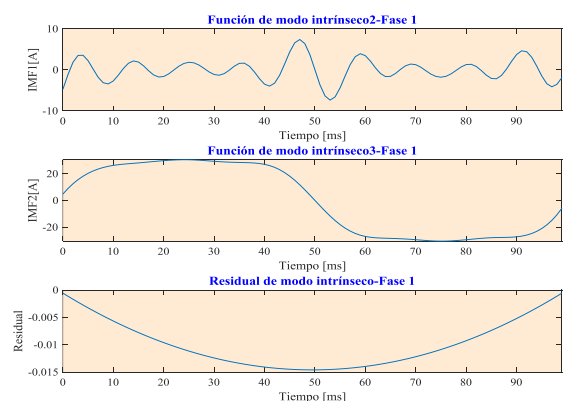


Figura 11 Funciones de modo intrínseco Fase 1 Hilbert Huang.

La Figura 11 describe como la onda original se descompone en dos armónicas correspondientes a cada IMF,

la primera con una amplitud máxima de 7.39 A y la segunda con una amplitud de 31.18 A. La función residual posee una amplitud de 0.022 A.

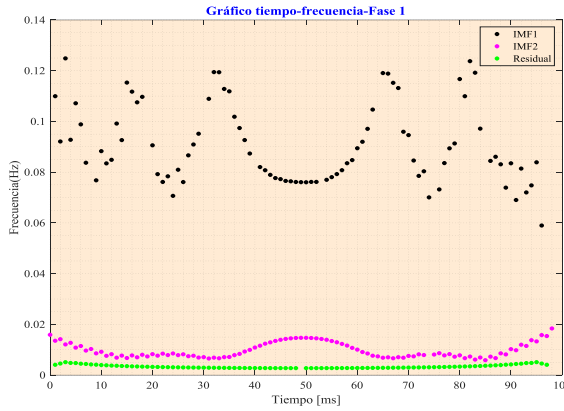


Figura 12 Señal tiempo-frecuencia Fase 1. Hilbert Huang.

En la Figura 12 se presenta el resultado tiempo-frecuencia de la transformada de Hilbert Huang, se observa que la primera armónica presenta una frecuencia de 0.9368 Hz y un momento de variación del armónico de [10 18 22 31 65 75 82] milisegundos, mientras que la segunda armónica presenta una frecuencia de 0.0182 Hz con un momento de variación del armónico de [25 65] milisegundos.

4.4. Análisis HHT fase-2.

En la Figura 13 se presenta las IMF obtenidos de la fase 2 por el método de Hilbert Huang.

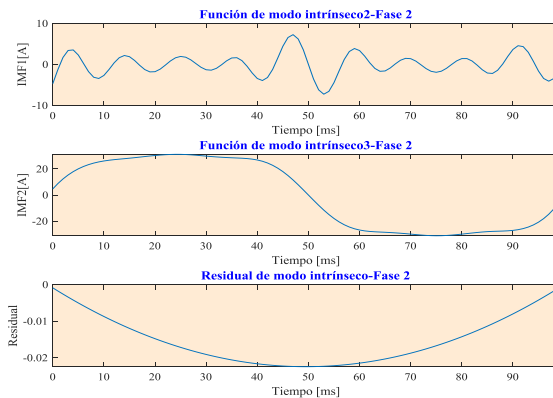


Figura 13 Funciones de modo intrínseco Fase 2 Hilbert Huang.

En la Figura 13 describe la forma en que la onda original se descompone en dos armónicas correspondientes a cada IMF, la primera con una amplitud máxima de 7.26 A y la segunda con una amplitud de 31.18 A. La función residual posee una amplitud de 0.022 A.

En la Figura 14 se presenta el resultado tiempo-frecuencia de la transformada de Hilbert Huang, se observa que la primera armónica presenta una frecuencia de 0.0857 Hz y un momento de variación del armónico de [10 18 22 31 65 75 82] milisegundos, mientras que la segunda armónica presenta una frecuencia de 0.0085 Hz con un momento de variación del armónico de [25 65] milisegundos.

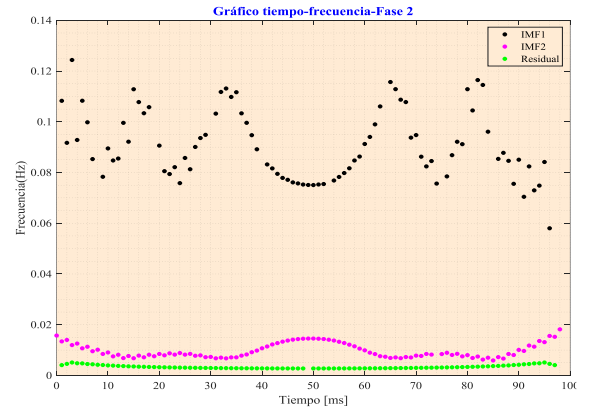


Figura 14 Señal tiempo-frecuencia Fase 2. Hilbert Huang.

4.5. Análisis de armónicos

Para el estudio armónico referente a la calidad energética se aplicó la normativa IEEE-529-2014, misma que proporciona límites para la distorsión armónica.

El circuito de iluminación de la ruta viva posee una corriente de corto circuito de 1.5 KA, además la corriente es de 17 A considerando la carga promedio. Aplicando la expresión descrita en la norma IEEE se tiene que:

$$\frac{I_{sc}}{I_L} = \frac{1.5KA}{17A} = 88.23 \quad (16)$$

Para coeficientes inferiores a 100, la norma establece que el porcentaje de

distorsión armónica permitida es del 10%.

En la tabla 7 se presenta la comparación entre los porcentajes obtenidos mediante la técnica de wavelet y la norma IEEE.

Tabla 7 : Comparación de resultados wavelet y norma IEEE-529.

Armónico #	IEEE-529	Wavelet
2	10%	11%
3	10%	11%
4	10%	0%
5	10%	1%
6	10%	1%
7	10%	1%
8	10%	4%
9	10%	5%
10	10%	4%

De la comparación es posible apreciar que los armónicos más nocivos para el circuito de iluminación son el segundo y el tercer armónico con un porcentaje del 11%, además no cumplen con el límite de distorsión armónico del 10% descrito en la norma IEEE-529.

4.6. Discusión de resultados.

El objetivo general que plantea la investigación es hallar los efectos que producen las luminarias tipo HID sobre los armónicos de la red de distribución. El análisis parte con la obtención de mediciones en un periodo determinado del circuito de luminarias, lo que representa un inconveniente puesto que se debe presentar una solicitud a la empresa distribuidora para proceder con la medición. Una vez obtenida la muestra se reconstruye la forma de onda en base al análisis armónico, este proceso conlleva un porcentaje de error debido a que se usa una de las mediciones de toda la muestra a comparación con el estudio [12] que tiene un ambiente de laboratorio para generar las diferentes formas de onda para el estudio. Para el análisis armónico aplicando la transformada de wavelet se hace uso de funciones propias de MATLAB como la

wavelet Packet, lo que brinda una precisión superior de cálculo a diferencia de funciones creadas desde 0 como se evidencia en los estudios [30] y [14]. Los resultados obtenidos con la técnica wavelet demuestran que al poseer luminarias HID en la red de alumbrado público provoca que la magnitud del segundo y tercer armónico se incremente hasta que sobrepasar el 11% de la fundamental. Los resultados obtenidos son importantes puesto los estudios [12] y [42] son similares, pero no encuentran afectación de las luminarias tipo HID sobre el segundo armónico, lo que demuestra que la técnica aplicada poseen un nivel de precisión superior.

Hasta el momento wavelet proporciona la magnitud de las armónicas de una señal sin embargo es necesario conocer el momento de variación del armónico. La transformada de Hilbert Huang ofrece dicho resultado de forma conjunta con las armónicas contenidas en la onda original denominadas IMF. El análisis armónico aplicando la técnica de Hilbert Huang demuestra que la curva de corriente contiene dos armónicas correspondientes a IMF1 e IMF2 con magnitud de 7.39A y 31.18A respectivamente, mientras que el momento de variación es de [10 18 22 31 65 75 82] milisegundos para la armónica 1 y de [25 65] para la armónica 2. Estudios como [12] y [42] aplican las técnicas de wavelet y Fourier, pero no distinguen el momento de variación del armónico a diferencia de la presente investigación que si lo hace.

5. Conclusiones

Los armónicos en la red eléctrica de distribución afectan de forma substancial, a pesar del tipo de carga lineal de los bombillos HID.

El estudio se realizó mediante la técnica matemática de Wavelet, con la familia Db 4 y nivel de descomposición 6, debido a que estudios previos

comprueban que es la mejor familia existente para el análisis de armónicos. Los resultados del estudio constatan que la componente fundamental se asocia a la mayor magnitud de energía contenida en la misma, mientras que la parte restante se distribuye desde la segunda armónica hasta la treinta y dos. El espectro resultante del análisis con wavelet describe que los armónicos que más afectan a la red son el segundo y el tercero, también existe una presencia importante de los armónicos 24,25 y 26 a diferencia de los armónicos 5 y 7 que poseen una incidencia casi nula en la red. La distorsión armónica admisible según la norma IEEE 519 – 2014 fue posible determinarla mediante la corriente de cortocircuito (por sus siglas en inglés ISC) y la potencia nominal a carga promedio, correspondiente a un porcentaje de distorsión armónica del 10%. Las armónicas desde la 3 hasta la 32 están dentro del límite admisible del 10%, sin embargo, el 2do y 3er armónico no cumple con el porcentaje admitido puesto que poseen un porcentaje del 11%.

El porcentaje armónico contenido en el tramo de la red eléctrica de distribución correspondiente a la investigación en curso no cumple con la distorsión armónica admisible, lo cual es de cuidado, puesto que el transformador está dedicado exclusivamente para iluminación, el cual está ocupado únicamente el 40% de su capacidad total. El análisis mediante HHT reveló que en la señal original de corriente contiene dos IMF (armónicas) con una magnitud de 7.39 A (IMF1) y 31.18 A (IMF2) con un residual de 0.022 A, además la frecuencia asociada a cada IMF es de 0.9868 Hz y 0.0182 Hz con un momento de variación armónica de [10 18 22 31 65 75 82] milisegundo y [25 65] ms segundo respectivamente para la fase 1, mientras que para la fase 2 se tienen dos IMF con una magnitud de 7.26 A y 31.18 A con un residual de 0.022 A, además la

frecuencia asociada a cada IMF es de 0.0857 Hz y 0.0085 Hz con un momento de variación armónica de [10 18 22 31 65 75 82] milisegundos y [25 65] milisegundos respectivamente. Los resultados expresan que además de obtener el número de armónicas y magnitudes contenidas en la señal original es posible conocer el momento preciso en donde la armónica inicia y termina, el cual es denominado como momento de variación armónica.

Con respecto a HHT se concluye que es una herramienta matemática muy robusta para el análisis de señales no estacionarias. La descomposición tiene como base la señal original de la red, sobre esta se aplica el método de descomposición de señales, para el cálculo de IMF's. El método de descomposición identifica puntos mínimos y máximos, para interpolar la onda mediante una spline y obtener la media local promedio de cada envolvente del conjunto de datos mínimos y máximos, permitiendo conocer la frecuencia instantánea de la onda, además de determinar la afección de un determinado armónico sobre la red. Este análisis demuestra superioridad sobre técnicas como Fourier o Wavelet, debido a que la precisión de resolución es muy robusta para el procesamiento de señales no estacionarias, además de proporcionar tiempo exacto de variación de las armónicas contenidas en la señal original.

6. Trabajos futuros.

Debido a que constantemente la tecnología avanza es usual la existencia de generación distribuida de forma intermitente, presencia de cargas no lineales y una multitud de dispositivos electrónicos que causan problema a la calidad de energía, se propone el estudio de armónicos empleando luminarios de diferente tecnología como: circuitos LED pequeños, circuitos LED grandes, reflectores

decorativos, lámparas de sodio de baja presión, bombillos de mercurio y una hibridación de los mismos, puesto que es un eslabón esencial en la calidad de la energía. La base para el estudio propuesto es la técnica de Hilbert Huang, puesto que permite el análisis de datos no lineales y de naturaleza no estacionaria. Las secuencias descritas se pueden descomponer en un número finito de funciones de modo intrínseco con su respectiva frecuencia instantánea para el análisis de las diferentes oscilaciones en escalas de tiempo que están contenidas en la red, logrando así identificar los armónicos contenidos en esta, además el análisis se complementa con la transformada de wavelet, puesto que esta proporciona todo el espectro armónico contenido en la red.

Un segundo trabajo futuro consiste en estudiar las técnicas de mitigación de armónicos en redes distribución como la implementación de filtros de potencia activa, con base en el análisis de las teorías PQ que permiten controlar las corrientes en base a la potencia activa del filtro. Por otra parte, existe la posibilidad de usar filtros pasivos a manera de arreglo con el fin de mitigar armónicos específicos de la red como lo son el 3°, 5° y 7°.

7. Referencias

- [1] L. Laskai, P. N. Enjeti, and I. J. Pitel, "White-noise modulation of high-frequency high-intensity discharge lamp ballasts," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 34, no. 3, pp. 597–605, 1998, doi: 10.1109/28.673731.
- [2] Sam Ben-Yaakov, M. Gulko, and A. Giter, "The simplest electronic ballast for HID lamps," pp. 634–640, 2002, doi: 10.1109/apec.1996.500507.
- [3] E. Deng and S. Cuk, "Negative incremental impedance and stability of fluorescent lamps," no. 518, pp. 1050–1056, 2002, doi: 10.1109/apec.1997.575779.
- [4] E. Sadeghian, "Modeling and Checking the Power Quality of High Pressure Sodium Vapor Lamp," *Int. J. Adv. Res. Electron. Commun. Eng.*, vol. 7, no. 3, pp. 232–237, 2018.
- [5] J. M. Alonso, A. J. Calleja, E. Lbpez, J. Ribas, and F. J. Ferrero, "Analysis and Experimental Results of a Single- Stage High-Power-Factor Electronic Based on Flyback Converter," *Tecnol. Electron.*, pp. 1142–1148, 1998.
- [6] R. Redl and J. D. Paul, "A new high-frequency and high-efficiency electronic ballast for HID lamps: topology, analysis, design, and experimental results," pp. 486–492 vol.1, 2008, doi: 10.1109/apec.1999.749726.
- [7] Wei Yan, Y. K. E. Ho, and S. Y. R. Hui, "Investigation on methods of eliminating acoustic resonance in small wattage high-intensity-discharge (HID) lamps," pp. 3399–3406, 2002, doi: 10.1109/ias.2000.882654.
- [8] H. Sharma, W. G. Sunderman, and A. Gaikwad, "Harmonic impacts of widespread use of CFL lamps on distribution systems," *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, pp. 1–5, 2011, doi: 10.1109/PES.2011.6039496.
- [9] J. ARAU, M. PONCE, A. LÓPEZ, J. CORREA, and J. M. ALONSO, "Electronic Ballast for Hid Lamps With High Frequency Square Waveform To Avoid Acoustic Resonances," *J. Circuits, Syst. Comput.*, vol. 13, no. 03, pp. 651–663, 2005, doi: 10.1142/s0218126604001623.
- [10] N. R. Nashad, M. J. Islam, S. Alam, R. M. Rahat, M. T. A.

- Begum, and M. R. Alam, "A Simplistic Mathematical Approach for Detection and Classification of Power Quality Events," pp. 698–703, 2017.
- [11] S. Ben-Yaakov and M. Shvartsas, "An electronic ballast for fluorescent lamps with no series passive elements," pp. 670–675, 2002, doi: 10.1109/apec.2001.912441.
- [12] S. Datta, S. K. Bandyopadhyay, and S. Mukherjee, "Measurement and analysis of harmonics contribution by HID lamp systems," *Found. Front. Comput. Commun. Electr. Eng. - Proc. 3rd Int. Conf. Found. Front. Comput. Commun. Electr. Eng. C2E2 - 2016*, no. April 2018, pp. 497–500, 2016, doi: 10.1201/b20012-97.
- [13] B. M. Mrabet and A. M. Chammam, "A study of the impact of a High Pressure Sodium (HPS) lamps on power quality," *2017 4th Int. Conf. Electr. Electron. Eng. ICEEE 2017*, pp. 56–61, 2017, doi: 10.1109/ICEEE2.2017.7935792.
- [14] J. Ribas, M. Rico-Secades, J. M. Alonso, J. Cardesin, and J. Garcia, "Evaluation of high-frequency sinusoidal waveform superposed with 3rd harmonic for stable operation of metal halide lamps," pp. 1483–1488, 2003, doi: 10.1109/ias.2002.1042751.
- [15] J. M. Alonso *et al.*, "Minimization of Acoustic Resonances in HID Lamps: Analysis and Comparison of Power Harmonics Content in High Frequency Non-Resonant Inverters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 20, no. 6, pp. 1467–1479, 2005, doi: 10.1109/tpel.2005.857563.
- [16] J. Zhang, G. Li, C. Xu, D. Shao, and L. Jiao, "Study of harmonic analysis based on improved discrete Fourier transform," *Proc. 2016 IEEE 11th Conf. Ind. Electron. Appl. ICIEA 2016*, pp. 2541–2545, 2016, doi: 10.1109/ICIEA.2016.7604021.
- [17] D. R. H. SÁNCHEZ, "Incidencia de los armónicos en la red de distribución eléctrica causada por la inclusión de vehículos eléctricos," Universidad Politecnica Salesiana Sede Quito, 2018.
- [18] D. E. A. CARRERA, "Implementación de la transformada de wavelet para la medición de los diferentes tipos de perturbaciones en el laboratorio de máquinas eléctricas," Universidad Politécnica Nacional, 2014.
- [19] M. J. Hermoso-Orzáez, A. Gago-Calderón, and J. I. Rojas-Sola, "Power quality and energy efficiency in the pre-evaluation of an outdoor lighting renewal with light-emitting diode technology: Experimental study and amortization analysis," *Energies*, vol. 10, no. 7, 2017, doi: 10.3390/en10070836.
- [20] A. Heidary, K. Ghorbanyan, H. Radmanesh, and H. R. R. Khamse, "Voltage sag and harmonic analysis in distribution network," *21st Electr. Power Distrib. Netw. Conf. EPDC 2016*, no. May, pp. 102–105, 2016, doi: 10.1109/EPDC.2016.7514791.
- [21] Mahdi Fayyazi, "A new novel method of harmonic analysis in power distribution networks using artificial intelligence," *CIREN - Open Access Proc. J.*, no. June, pp. 12–15, 2017.
- [22] J. Cai and X. Li, "Gear Fault Diagnosis Based on Empirical

- Mode Decomposition and 1.5 Dimension Spectrum,” *Shock Vib.*, vol. 2016, 2016, doi: 10.1155/2016/5915762.
- [23] V. Puliafito, S. Vergura, and M. Carpentieri, “Fourier, wavelet, and Hilbert-Huang transforms for studying electrical users in the time and frequency domain,” *Energies*, vol. 10, no. 1, pp. 10–12, 2017, doi: 10.3390/en10020188.
- [24] R. Wang, Y. Zhang, and J. Guo, “Power harmonic analysis based on orthogonal trigonometric functions family,” *China Int. Conf. Electr. Distrib. CICED*, 2010.
- [25] M. Hosseini and S. Jalilzade, “New Method to Analyze Power Quality Phenomena Using Wavelet and S- Transform Matrix,” *18th Electr. Power Distrib. Conf.*, pp. 1–4, 2013, doi: 10.1109/EPDC.2013.6565970.
- [26] K. Deng, J. Cao, P. Guo, and X. Xu, “Energy Saving Analysis of Harmonic Suppression in a Distribution Network,” *2013 Fourth Int. Conf. Netw. Distrib. Comput.*, pp. 121–125, 2013, doi: 10.1109/ICNDC.2013.13.
- [27] S. Alshareef and S. Talwar, “A New Approach Based on Wavelet Design and Machine Learning for Islanding Detection of Distributed Generation,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1575–1583, 2014, doi: 10.1109/TSG.2013.2296598.
- [28] K. W. Chan and X. Luo, “Real-time scheduling of electric vehicles charging in low-voltage residential distribution systems to minimise power losses and improve voltage profile,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 8, no. 3, pp. 516–529, 2014, doi: 10.1049/iet-gtd.2013.0256.
- [29] T. Wu, D. Jiang, Y. Wang, and A. Lei, “Study on a Harmonic Measurement and Analysis Method for Power Supply System,” *Int. J. Emerg. Electr. Power Syst.*, vol. 18, no. 3, 2017, doi: 10.1515/ijeeps-2016-0271.
- [30] A. Kalair, N. Abas, A. R. Kalair, Z. Saleem, and N. Khan, “Review of harmonic analysis, modeling and mitigation techniques,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 78, no. February, pp. 1152–1187, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.04.121.
- [31] N. E. Huang and S. S. P. Shen, *Hilbert-Huang Transform and its Applications*, 5th ed., vol. 5. World Scientific Publishing, 2005.
- [32] M. J. Afroni and D. Sutanto, “The Hilbert Huang transform for decomposition of power quality waveforms,” *2014 Australas. Univ. Power Eng. Conf. AUPEC 2014 - Proc.*, no. October, pp. 1–6, 2014, doi: 10.1109/AUPEC.2014.6966613.
- [33] N. O. A.-O. N.E. Huang, *The Hilbert–Huang Transform in Engineering*. 2005.
- [34] F. Wang, “Harmonic analysis of electrified railway based on improved HHT,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1955, no. April, 2018, doi: 10.1063/1.5033756.
- [35] Y. Ji and H. Wang, “A revised Hilbert–Huang transform and its application to fault diagnosis in a rotor system,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 12, 2018, doi: 10.3390/s18124329.
- [36] F. A. Rodriguez-Marengo, “Transformada de Hilbert-Huang y sus aplicaciones en ingeniería y ciencias,” no. III Jornadas de Acústica (JOSAC 2013), pp. 1–60, 2013.
- [37] P. Li, J. Gao, D. Xu, C. Wang,

- and X. Yang, “Hilbert-Huang transform with adaptive waveform matching extension and its application in power quality disturbance detection for microgrid,” *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 4, no. 1, pp. 19–27, 2016, doi: 10.1007/s40565-016-0188-5.
- [38] A. M. Carmona, “Aplicación de la transformada de Hilbert-Huang en la detección de modos de variabilidad hidroclimática en Colombia,” no. September 2015, 2012.
- [39] R. Bouhali, K. Tadjine, H. Bendjama, and M. N. Saadi, “Fault diagnosis of bladed disc using wavelet transform and ensemble empirical mode decomposition,” *Aust. J. Mech. Eng.*, vol. 00, no. 00, pp. 1–11, 2018, doi: 10.1080/14484846.2018.1499471.
- [40] M. Vukobratović, P. Marić, S. Nikolovski, and H. Glavaš, “Distributed generation harmonic interaction in the active distribution network,” *Teh. Vjesn.*, vol. 25, no. 6, pp. 1720–1730, 2018, doi: 10.17559/TV-20171025123650.
- [41] G. A. Mier, “Power Quality Analysis for High Pressure Sodium Lamps in Low Voltage Networks,” Delft University of Technology, 2018.
- [42] N. A. Hărăbor and A. Hărăbor, “Harmonic distortions of the AC waveform for a Hg HID lamp,” *Ann. Univ. Craiova, Phys.*, vol. 21, no. 1, pp. 30–39, 2011.

8. Matriz de estado del arte

Tabla 8 : Matriz de estado del arte

Análisis armónico en la red de distribución eléctrica para determinar los efectos causados por lámparas HID usando transformada de Wavelet y Hilbert Huang.																									
	DATOS			TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRIC- CIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA					
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	# citas	Análisis de armónicos en las Redes de Distribución	Incidencia de armónicos	Impacto de lámparas HID en redes	Microrredes inteligentes	Métodos de diseño de lámparas HID	Minimización de armónicos	Energía Fotovoltaica en estaciones	Potencias de los Balastos	Optimización de Alumbrado Público	Minimizar Costos fuentes de energía	Estabilización del Balastro	Capacidad de los Balastos	Capacidad de los recursos energéticos	Simulación de Hilbert Huang	Heurística de Optimización	Simulación de Wavelet	Programa Estocástico (MSP)	Asignación Óptima de recursos	Espectro armónico	Potencia Unificada de HID	Predisposición de sistema apartado	Integración al sistema reduciendo
1	2019	A Machine Learning Based Classification Approach for Power Quality Disturbances Exploiting Higher Order Statistics in the EMD Domain	0	☑		☑			☑					☑				☑	☑			☑			
2	2018	Modeling and Checking the Power Quality of High-Pressure Sodium Vapor Lamp	2	☑		☑			☑			☑	☑			☑			☑		☑	☑	☑		
3	2018	Power Quality Analysis for High Pressure Sodium Lamps in Low Voltage Networks	4				☑		☑					☑	☑	☑			☑			☑		☑	☑
4	2018	A revised Hilbert–Huang transform and its application to fault diagnosis in a rotor system	7	☑	☑				☑			☑		☑	☑	☑						☑		☑	
5	2018	Fault diagnosis of bladed disc using wavelet transform and ensemble empirical mode decomposition	2	☑					☑					☑								☑		☑	
6	2018	Harmonic analysis of electrified railway based on improved HHT	1	☑		☑			☑	☑		☑		☑	☑	☑	☑		☑		☑	☑		☑	☑
7	2018	Incidencia de los armónicos en la red de distribución eléctrica causada por la inclusión de vehículos eléctricos.	1	☑		☑			☑					☑				☑	☑			☑			
8	2018	A Decomposition Method of Transient Power Quality Waveforms Combining IHC-HHT and SFVS	2	☑					☑					☑								☑		☑	
9	2017	A new novel method of harmonic analysis in power distribution networks using artificial intelligence	6	☑					☑	☑				☑		☑	☑					☑			
10	2017	Influence analyses of harmonics on distribution system in consideration of nonlinear loads and estimation of harmonic source	5	☑	☑				☑		☑			☑	☑	☑		☑				☑	☑		☑
11	2017	Power quality and energy efficiency in the pre-evaluation of an outdoor lighting renewal with light-emitting diode technology Experimental study and amortization analysis	8	☑		☑			☑					☑	☑	☑				☑	☑	☑		☑	
12	2017	Review of harmonic analysis, modeling and mitigation techniques	1	☑					☑	☑						☑						☑			
13	2017	Study on a Harmonic Measurement and Analysis Method for Power Supply System	1	☑				☑	☑												☑	☑		☑	

Análisis armónico en la red de distribución eléctrica para determinar los efectos causados por lámparas HID usando transformada de Wavelet y Hilbert Huang.

DATOS		TEMÁTICA						FORMULACIÓN DEL PROBLEMA						RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA				
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	# citas	Análisis de armónicos en las Redes de Distribución	Incidencia de armónicos	Impacto de lámparas HID en redes	Microrredes inteligentes	Métodos de diseño de lámparas HID	Minimización de armónicos	Energía Fotovoltaica en estaciones	Potencias de los Balastos	Optimización de Alumbrado Público	Minimizar Costos fuentes de energía	Estabilización del Balastro	Capacidad de los Balastos	Capacidad de los recursos energéticos	Simulación de Hilbert Huang	Heurística de Optimización	Simulación de Wavelet	Programa Estocástico (MSP)	Asignación Óptima de recursos	Espectro armónico	Potencia Unificada de HID	Predisposición de sistema apartado	Integración al sistema reduciendo
14	2017	Fourier, wavelet, and Hilbert-Huang transforms for studying electrical users in the time and frequency domain	4	☑	☑				☑			☑		☑		☑						☑		☑	☑
15	2016	Measurement and analysis of harmonics contribution by HID lamp systems	10	☑		☑			☑		☑			☑	☑	☑		☑				☑	☑		☑
16	2016	Voltage sag and harmonic analysis in distribution network	7	☑			☑	☑	☑					☑		☑						☑		☑	☑
17	2016	Gear Fault Diagnosis Based on Empirical Mode Decomposition and 1.5 Dimension Spectrum	0	☑		☑		☑	☑					☑		☑			☑			☑	☑		
18	2016	Hilbert-Huang transform with adaptive waveform matching extension and its application in power quality disturbance detection for microgrid	20	☑		☑			☑	☑		☑		☑	☑	☑	☑		☑		☑	☑	☑	☑	☑
19	2015	Aplicación de la transformada de Hilbert-Huang en la detección de modos de variabilidad hidro climática en Colombia	2	☑					☑					☑								☑		☑	
20	2014	Implementación de la transformada de wavelet para la medición de los diferentes tipos de perturbaciones en el laboratorio de máquinas eléctricas	4	☑		☑			☑					☑				☑	☑			☑			
21	2014	A New Approach Based on Wavelet Design and Machine Learning for Islanding Detection of Distributed Generation	2	☑		☑			☑	☑				☑		☑	☑		☑			☑		☑	☑
22	2014	Real-time scheduling of electric vehicles charging in low-voltage residential distribution systems to minimize power losses and improve voltage profile	6	☑		☑			☑					☑				☑	☑			☑			
23	2014	The Hilbert Huang transform for decomposition of power quality waveforms	8	☑					☑					☑								☑		☑	
24	2013	New Method to Analyze Power Quality Phenomena Using Wavelet and S- Transform Matrix	5	☑		☑			☑					☑				☑	☑			☑			
25	2013	Energy Saving Analysis of Harmonic Suppression in a Distribution Network	1	☑		☑			☑	☑				☑		☑	☑		☑			☑		☑	☑
26	2013	Transformada de Hilbert-Huang y sus aplicaciones en ingeniería y ciencias	1	☑		☑			☑	☑				☑		☑	☑		☑			☑		☑	☑
27	2011	Harmonic impacts of widespread use of CFL lamps on distribution systems	1	☑					☑	☑				☑		☑	☑					☑			
28	2011	Harmonic distortions of the AC waveform for a HID lamp	5	☑		☑			☑	☑				☑		☑	☑		☑			☑		☑	☑

Análisis armónico en la red de distribución eléctrica para determinar los efectos causados por lámparas HID usando transformada de Wavelet y Hilbert Huang.

	DATOS			TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA					RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA				
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	#citas	Análisis de armónicos en las Redes de Distribución	Incidencia de armónicos	Impacto de lámparas HID en redes	Microrredes inteligentes	Métodos de diseño de lámparas HID	Minimización de armónicos	Energía Fotovoltaica en estaciones	Potencias de los Balastos	Optimización de Alumbrado Público	Minimizar Costos fuentes de energía	Estabilización del Balastro	Capacidad de los Balastos	Capacidad de los recursos energéticos	Simulación de Hilbert Huang	Heurística de Optimización	Simulación de Wavelet	Programa Estocástico (MSP)	Asignación Óptima de recursos	Espectro armónico	Potencia Unificada de HID	Predisposición de sistema apartado	Integración al sistema reduciendo
29	2010	Power harmonic analysis based on orthogonal trigonometric functions family	1	<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>								<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	
30	2008	A new high-frequency and high-efficiency electronic ballast for HID lamps: topology, analysis	8	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>			
31	2005	Electronic Ballast for Hid Lamps with High Frequency Square Waveform to Avoid Acoustic Resonances	2	<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>			
32	2005	Minimization of Acoustic Resonances in HID Lamps: Analysis and Comparison of Power Harmonics Content in High Frequency Non-Resonant Inverters	5	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>			
33	2003	Evaluation of high-frequency sinusoidal waveform superposed with 3rd harmonic for stable operation of metal halide lamps	3	<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>			
34	2002	The simplest electronic ballast for HID lamps	3	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>							<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
35	2002	Negative incremental impedance and stability of fluorescent lamps	0	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>								<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>						<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
36	2002	Investigation on methods of eliminating acoustic resonance in small wattage high-intensity-discharge (HID) lamps	17	<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>						
37	2002	An electronic ballast for fluorescent lamps with no series passive elements	18	<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>			
38	1998	White-noise modulation of high-frequency high-intensity discharge lamp ballasts	31	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
39	1998	Analysis and Experimental Results of a Single- Stage High-Power-Factor Electronic Based on Fly back Converter	37	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>
		CANTIDAD:		38	3	21	2	4	38	14	3	7	1	36	9	26	12	10	19	1	5	37	7	19	13

8.1. Resumen e Indicadores del estado del arte

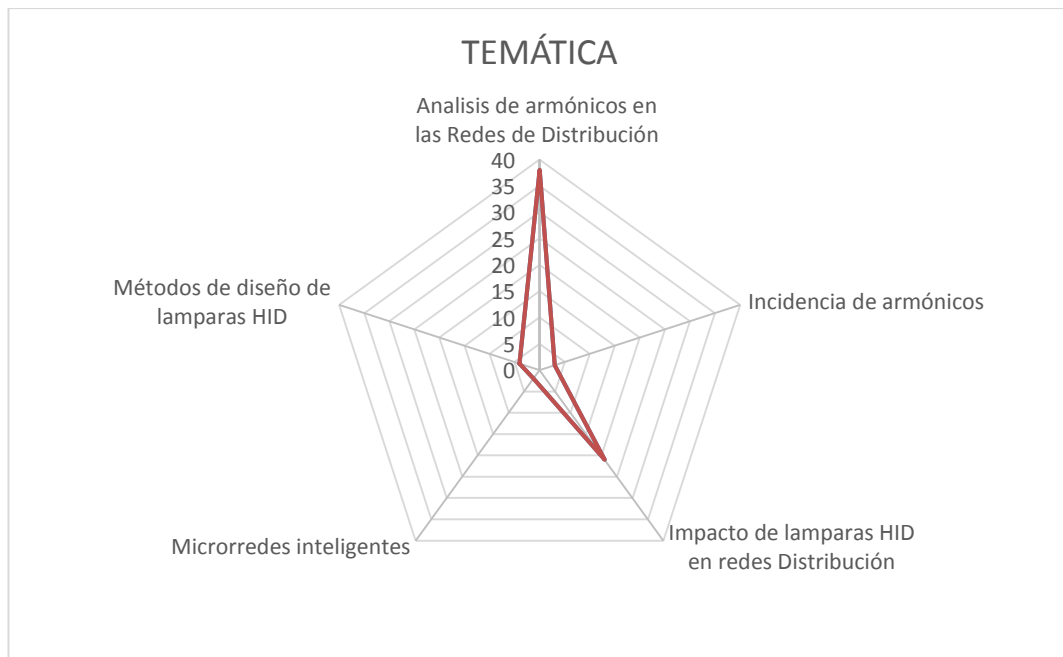


Figura 15 Temática de estado de arte.

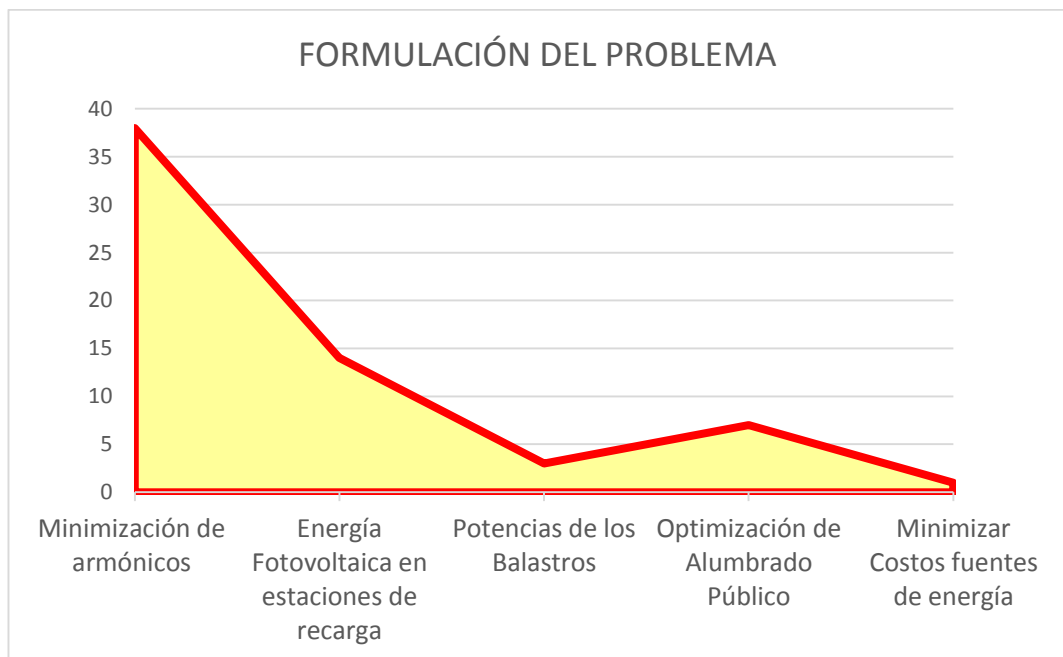


Figura 16 Formulación del problema del estado de arte.

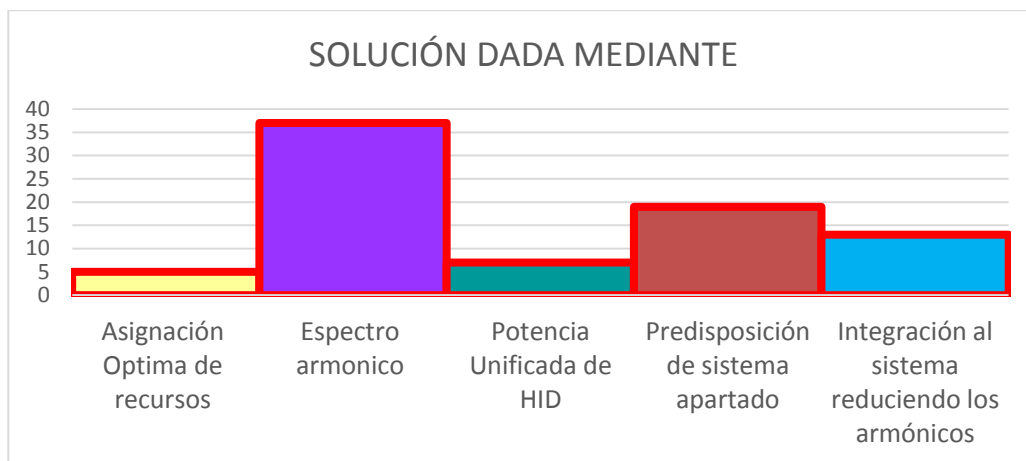


Figura 17 Solución propuesta del estado de arte.